

## ПЕСЧАНО-ЛЕДЯНЫЕ ЖИЛЫ НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ ЯКУТИИ

А.Ю. Деревягин, В.В. Куницкий\*, Х. Мейер\*\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,  
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, [dereviag@online.ru](mailto:dereviag@online.ru)

\* Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 1, Россия, [kunitsky@mpi.ysn.ru](mailto:kunitsky@mpi.ysn.ru)

\*\* Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера,  
14473, Потсдам, Телеграфенберг А-43, Германия, [hmeyer@awi-potsdam.de](mailto:hmeyer@awi-potsdam.de)

Приводятся новые данные по распространению, криогенному строению и изотопному составу ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) песчано-ледяных жил в плейстоценовых песчаных отложениях (возраст более 50 тыс. лет назад) на побережье и островах моря Лаптевых. Мощные толщи песков подстилают отложения верхнеплейстоценового ледового комплекса и содержат несколько ярусов песчано-ледяных жил. В изученных разрезах описаны переходы от песчано-ледяных жил к повторно-жильным льдам и зоны контакта песчано-ледяных жил с вышележащими повторно-жильными льдами ледового комплекса. Наиболее легким изотопным составом (средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-34,3$  до  $-36,0$  ‰ и  $\delta\text{D}$  от  $-258,2$  до  $-280,8$  ‰) характеризуются древние полигонально-жильные системы, развитые в средневерхнечетвертичных отложениях о. Большой Ляховский. Песчано-ледяные жилы в верхнеплейстоценовых песках мыса Мамонтов Клык (Анабар-Оленекское междуречье) имеют более тяжелый изотопный состав (средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-28,5$  до  $-31,7$  ‰ и  $\delta\text{D}$  от  $-222,4$  до  $-245,4$  ‰). Изотопный состав песчано-ледяных жил указывает на холодные и сухие климатические условия периода их формирования. Сравнительный анализ изотопного состава изученных песчано-ледяных жил и повторно-жильных льдов показывает их сходство. Приводятся данные об условиях формирования и изотопном составе современных песчано-ледяных жил на Земле Бунге.

*Песчано-ледяные жилы, повторно-жильные льды, криогенное строение, изотопный состав, палеоклиматические условия*

## COMPOSITE WEDGES IN THE NORTH OF YAKUTIA

A.Yu. Dereviagin, V.V. Kunitsky\*, H. Meyer\*\*

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,  
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, [dereviag@online.ru](mailto:dereviag@online.ru)

\* Melnikov Permafrost Institute SB RAS,  
677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 1, Russia, [kunitsky@mpi.ysn.ru](mailto:kunitsky@mpi.ysn.ru)

\*\* Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research,  
14473, Telegrafenberg A-43, Potsdam, Germany, [hmeyer@awi-potsdam.de](mailto:hmeyer@awi-potsdam.de)

New data on spreading, cryogenic structure and isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) of composite wedges in the Pleistocene (age more than 50 000 yrs BP) sand deposits in the Laptev Sea region have been presented. Thick sand deposits underlay Late Pleistocene ice complex and contain several stages of composite wedges. The transitions from composite wedges to polygonal ice wedges and contacts between composite wedges and underlying ice complex wedges are described in profiles. The lightest isotopic composition has been determined for the Middle Pleistocene composite wedges and ice wedges at Bolshoy Lyakhovsky Island (mean values  $\delta^{18}\text{O}$  vary from  $-34,3$  to  $-36,0$  ‰ and  $\delta\text{D}$  from  $-258,2$  to  $-280,8$  ‰). The Late Pleistocene composite ice wedges at Cape Mamontov Klyk (Anabar-Olenyok interfluvium) are characterized by a heavier isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$  from  $-28,5$  to  $-31,7$  ‰ and  $\delta\text{D}$  from  $-222,4$  to  $-245,4$  ‰). The isotopic compositions of composite wedges indicate cold and dry climatic conditions of the period of their formation. The analysis of isotopic parameters of ice wedges and of composite wedges clearly shows their similarity. Recent formation conditions of composite wedges as well as their isotopic composition have been presented for Zemlya Bunge.

*Composite wedges, polygonal ice wedges, cryogenic structure, isotopic composition, paleoclimatic conditions*

## ВВЕДЕНИЕ

Песчано-ледяные жилы (ПЛЖ) относятся к полигонально-жильным криогенным структурам. Фактические данные об этих жилах весьма ограничены. Т. Певе, Т. Берг и Р. Блек находят песчано-ледяные жилы (composite wedges) в Антарктиде на Земле Виктории [Péwé, 1959; Black, Berg, 1964;

Berg, Black, 1966]. В 1960 г. Е.Г. Катаасонова вскрывает на водоразделах Центральной Якутии жилы льда, наполовину состоящие из супеси [Katasонова, 1962]. О возможном развитии ПЛЖ в дельте Лены и на Земле Бунге пишет Н.Н. Романовский [1977]. Это подтверждается в дальнейшем иссле-

дованиями В.В. Куницкого [1989], который отмечает широкое распространение ПЛЖ в дельте Лены в разрезах песков, подстилающих отложения ледового комплекса, называя эти криогенные структуры “полосатиками”. Позднее он привел описание “полосатиков” в разрезе четвертичных отложений о. Бол. Ляховский [Куницкий, 1998]. Первые данные об изотопном составе ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) древних песчано-ледяных жил о. Бол. Ляховский были получены в ходе совместной российско-германской экспедиции в 1999 г. [Meyer et al., 2002].

На Канадском севере ископаемые песчано-ледяные жилы и жильные льды в песчаных отложениях позднего плейстоцена имеются в дельте р. Макензи [Mackay, Matthews, 1983; Murton et al., 2000]. В работе Дж.Р. Маккея и Дж.В. Матьюза приводится изотопно-кислородный состав льда-цемента песчаных отложений, вмещающих такие структуры.

Полигонально-жильные структуры с песчано-ледяным заполнителем морозобойных трещин являются переходным звеном от первично-песчаных жил к повторно-жильным льдам (ПЖЛ) и находятся в тесной парагенетической связи с ними. По существующим в настоящее время представлениям песчано-ледяные жилы формируются в крайне суровых климатических условиях. Места находок таких жил тяготеют к территории, расположенной по периферии ледниковых щитов плейстоцена, где были суровые геоэкологические условия, господствовали стоковые ветры, приводившие к дефляции, переносу песчаного и гравийного материала и засыпанию его в морозобойные трещины [Романовский, 1977, 1993].

Образуются ПЛЖ в том случае, когда в одни годы морозобойные трещины заполняются водой, замерзающей и образующей жилки конгломерационного льда, в другие годы – песком. Вещественный состав вертикально ориентированных жилок обломочного материала в ПЛЖ соответствует составу вмещающих отложений.

Заполнение трещин песком [Романовский, 1977] отмечается при глубоком типе оттаивания, когда естественная влажность пород в сезонном слое (СТС)  $W < 1/3(W_{\text{п}} - W_{\text{н}})$ , а заполнение трещин водой, переходящей в лед при среднем и мелком типе оттаивания происходит, когда  $W > 1/3(W_{\text{п}} - W_{\text{н}})$ , где  $W_{\text{п}}$  – полная влагоемкость пород (%);  $W_{\text{н}}$  – влагоемкость незамерзшей воды (%). Периодические изменения влажности пород в СТС, при которых в одни годы морозобойные трещины заполняются песком, в другие – талыми водами, приводят к образованию песчано-ледяных жил.

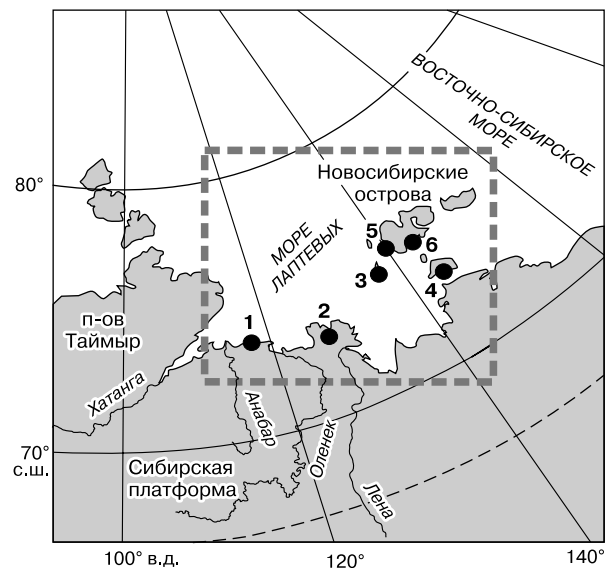
В настоящей работе представлены результаты совместных российско-германских исследований 1999–2005 гг., касающиеся распространения, строения, изотопного состава и условий формирования песчано-ледяных жил на крайнем севере Якутии.

Определения содержания стабильных изотопов кислорода и водорода осуществлялись в лаборатории Института полярных и морских исследований им. А. Вегенера в Потсдаме. Оценка значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  приводится в промилле (‰) по отношению к “стандарту средней океанической воды” (SMOW). “Избыток дейтерия” рассчитывался по формуле  $d_{\text{ex}} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$  [Dansgaard, 1964]. Отметим, что  $^{14}\text{C}$ -датирование органических включений проводилось AMS-методом в лаборатории Лейбница в Киле (Германия).

## РАЙОН РАБОТ

Исследования песчано-ледяных жил совместной российско-германской экспедицией проводились в дельте Лены, на Новосибирских островах и на севере Анабаро-Оленекского междуречья (рис. 1). Основное внимание в настоящей статье уделено результатам работ последней экспедиции 2003–2005 гг. на участке мыс Мамонтов Клык (73°35' с.ш., 117°10' в.д.). Здесь в пределах приморской низменности Анабаро-Оленекского междуречья мощные ПЛЖ были обнаружены и опробованы в толще песков, подстилающих отложения ледового комплекса [Meyer, Dereviagin, 2004].

Исследуемая часть Анабаро-Оленекского междуречья с мысом Мамонтов Клык представляет собой пологий ступенчатый склон северного подножия кряжа Прончищева. Территория относится к зоне субарктической тундры и характеризуется суровым континентальным арктическим климатом с холодной продолжительной зимой и



**Рис. 1. Расположение участков исследования и опробования песчано-ледяных жил:**

1 – м. Мамонтов Клык; 2 – дельта Лены; 3 – о. Столбовой; 4 – о. Бол. Ляховский; 5 – о. Котельный; 6 – Земля Бунге.

коротким дождливым летом. Среднегодовая температура воздуха составляет  $-14,0...-14,5^{\circ}\text{C}$ . Число дней с отрицательной температурой воздуха более 254, а среднезимняя температура воздуха примерно равна  $-22^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура летнего периода не более  $10^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая сумма осадков составляет 230–270 мм, из них до 75 % выпадает в летний период. Снежный покров устанавливается в конце сентября и разрушается в конце июня. Высота снежного покрова в среднем не более 20–30 см. Снежники, формирующиеся в депрессиях рельефа, встречаются до середины августа.

Данные о геокриологических условиях и криогенном строении пород северной части Анабаро-Оленекского междуречья крайне немногочисленны. О.Г. Боярский и К.Л. Митт, проводившие в 1959 г. маршрутные исследования в этом районе, отметили широкое распространение мощных сингенетических ПЖЛ в оторфованных иловатых супесях [Боярский, Митт, 1961]. Район относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых оценивается в 400–600 м [Геокриология СССР, 1989]. Среднегодовая температура пород составляет около  $-12^{\circ}\text{C}$ . Мощность СТС изменяется от 0,2 до 0,5 м.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На участке мыс Мамонтов Клык разрез четвертичных отложений был вскрыт естественными обнажениями и буровыми скважинами. Нижняя часть разреза песчаная, с мощными песчано-ледяными жилами, уходящими своей нижней частью под уровень моря (комплекс 1). Ширина ПЛЖ, вскрытых естественными обнажениями на берегу моря Лаптевых, варьирует от 1,0–1,5 до 4–5 м, а их видимая мощность достигает 2,5–3,0 м (см. фотографию на обложке).

Кровля песчаных отложений неровная, ступенчатая, имеет общий наклон с юга от подножий кряжа Прончищева на север к морю Лаптевых. На некоторых участках берегового обнажения кровля песков поднимается до абсолютных отметок 12–15 м (мыс Мамонтов Клык), опускаясь на других ниже уровня моря (долина р. Нучча-Джеилях).

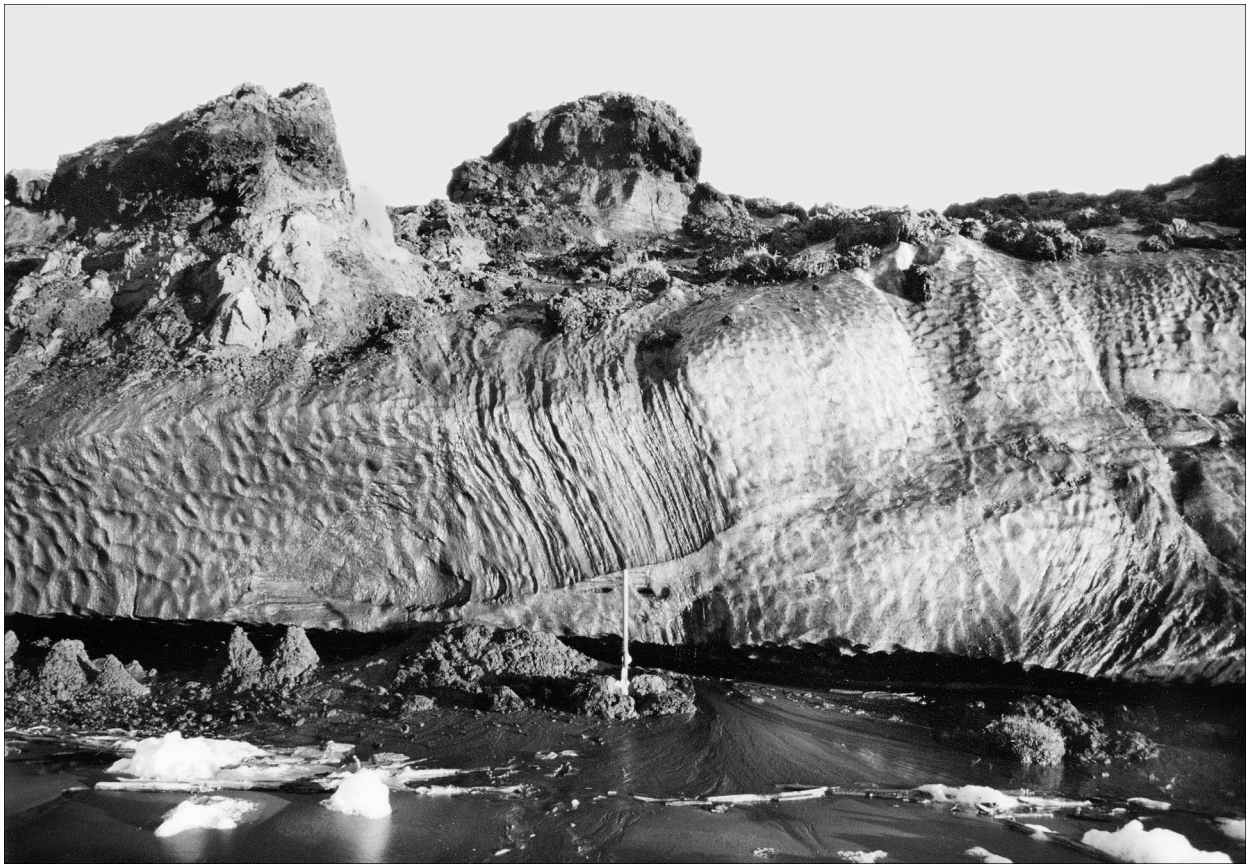
По данным летних полевых работ 2003 г. и зимних буровых работ 2005 г., общая мощность песчаных отложений около 50 м. Естественные обнажения и скважина С-1 глубиной 60,8 м, расположенная на абсолютной отметке 27 м, вскрыли в песках несколько ярусов песчано-ледяных жил в интервале глубин от +10 до –14 м (ниже уровня моря). Головы ПЛЖ, за исключением верхнего яруса, оплавлены и срезаны перекрывающими их слоями. В песчаной толще отмечены также фрагменты первично-песчаных жил. В субаквальной

части разреза песчаная толща с фрагментами ПЛЖ достигает мощности около 47 м и подстилается толщей предположительно морских отложений, представленных суглинками, глинами, алевритами и песками.

Выше по разрезу пески перекрываются пачкой переслаивающихся алевритов, песков и торфа (комплекс 2). Мощность этой пачки невыдержанна и на отдельных участках берегового обнажения достигает 3–5 м. Криогенное строение характеризуется наличием небольших ярусных (“висячих”) ПЖЛ, приуроченных к торфяным прослоям, узкие хвосты которых иногда внедряются в нижележащие ПЛЖ. В ряде случаев здесь отмечаются переходы в пределах одной жилы от повторно-жильных льдов к песчано-ледяным жилам. Так, опробованная жила IW-10 содержит три фрагмента ПЛЖ и два фрагмента ПЖЛ.

Разрез венчает 15–20-метровая толща отложений ледового комплекса, представленного неяснослоистыми темно-серыми оторфованными алевритами, с мощными непрерывными по вертикали ПЖЛ (комплекс 3). В верхней части разреза отмечаются внедрения в ледовый комплекс молодых голоценовых ПЖЛ. Сквозные повторно-жильные льды ледового комплекса пронизывают весь разрез берегового обнажения, проходят через пачку переслаивающихся алевритов и торфа, разрезая прослой торфа на отдельные линзы. Повторно-жильные льды выклиниваются на границе с нижележащими песками, а в некоторых случаях проникают и ниже в пески, уходя своими хвостами под уровень моря. Жилы ледового комплекса заметно расширяются снизу вверх, достигая уже в комплексе 2 ширины 3–5 м. Внедрение повторно-жильных льдов в песчано-ледяные жилы создает сложные ледяные системы пересекающихся ПЛЖ и ПЖЛ (рис. 2).

Песчано-ледяные жилы отмечены в этом районе впервые, поэтому более подробно остановимся на их описании и особенностях разреза. От уреза воды береговое обнажение вскрывает толщу серых, желто-серых, буровато-серых тонко- и мелкозернистых пылеватых песков. В песках прослеживается горизонтальная (местами косая) слоистость за счет их различного гранулометрического состава. Верхние 1,5–2,0 метра разреза песков содержат нитевидные корни растений. Контакт песков с вышележащими отложениями, которые включают линзы и прослои торфа, нечеткий и неровный. Наблюдается постепенный переход от тонкозернистых песков к вышележащим серым алевритам, сопровождающийся увеличением в разрезе растительных остатков, включением сначала мелких, а затем более крупных линз и прослоев торфа, появлением фрагментов криотурбированных погребенных почв.



**Рис. 2. Участок берегового обнажения на мысе Мамонтов Клык:**

контакт верхнеплейстоценовых повторно-жильных льдов и песчано-ледяной жилы (центральная часть фотографии).

Нижняя часть разреза песков, также содержащая ПЛЖ, вскрытая буровыми скважинами, представлена пачкой буровато-серых среднезернистых, реже мелкозернистых песков с косой, а местами горизонтальной слоистостью. Слоистость обусловлена разной зернистостью отдельных прослоев, а также наличием прослоев с органикой. Между отмеченными ярусами ПЛЖ здесь встречаются отдельные песчаные прослои с линзовидной и базальной криогенной текстурой.

Возраст верхней части разреза песков (около 1,5–2,0 м над уровнем моря) может быть охарактеризован двумя полученными методом IRSL (infrared stimulated luminescence) датами – 35,1 и 56,2 тыс. лет [Magens et al., 2005]. Перекрывающие пески прослои и линзы торфа имеют серию  $^{14}\text{C}$ -датировок: более 44 520 лет (KIA-25085), 45 870  $\pm$  2470/–1890 лет (KIA-25037), 43 510  $\pm$  1010/–900 лет (KIA-25088). Вскрытые скважинами морские отложения, подстилающие толщу пресноводных песков, датированные IRSL-

методом, имеют возраст около 110 тыс. лет (*устное сообщение* Д.Ю. Большинова, ААНИИ). Таким образом, толща песков с ПЛЖ на участке мыс Мамонтов Клык формировалась в верхнем плейстоцене, в муруктинское (зырянское) время, примерно 50–100 тыс. лет назад.

Строение песчано-ледяных жил характеризуется ритмичным чередованием вертикально (иногда субвертикально) ориентированных неровных тонких клиньев (элементарных жилок) льда и песка. Ширина жилок льда изменяется от 1 до 15 мм, при среднем значении 6–8 мм. Ширина прослоев песка несколько меньше и в среднем составляет около 1–3 мм. В горизонтальном срезе (вид жилы сверху) прослои песка имеют плетенчатую структуру, извилистые границы (рис. 3). Своеобразные натечные формы, хорошо наблюдаемые в горизонтальном и вертикальном сечениях ПЛЖ, свидетельствуют не только об эоловом, но и о водном заполнении морозобойных трещин. Содержащийся в жилах лед то более чистый и прозрачный, то более



**Рис. 3. Керн скважины С-1, содержащий фрагмент песчано-ледяной жилы (фото В.В. Куницкого).**

загрязненный минеральными частицами вмещающих отложений (серым, серо-желтым пылеватым песком) и мелкими (до 1 мм) пузырьками воздуха. Боковые контакты с вмещающими песчано-ледяные жилы песками четкие, неровные. Вмещающие ПЛЖ пески имеют массивную криогенную текстуру и нередко характеризуются очень высоким содержанием льда-цемента. Весовая влажность льдистых песков достигает 25–30 %. При оттаивании пески имеют текучую консистенцию.

Сравнивая разрезы с ПЛЖ на участке мыс Мамонтов Клык и исследованные ранее в 1999–2002 гг. разрезы на Новосибирских о-вах и в дельте Лены, можно заметить, что они имеют сходное криогенное строение. Вместе с тем в изученных разрезах, содержащих ПЛЖ, можно отметить ряд особенностей, касающихся возраста, состава и влажности вмещающих отложений, размеров ПЛЖ, ширины ледяных и минеральных прослоев, контактов и переходов в ПЖЛ.

На о. Столбовой песчано-ледяная жила вскрыта в желто-коричневых пылеватых тонкозернистых песках (при оттаивании имеющих текучую консистенцию) с включениями веточек и корней трав. Абсолютный возраст растительных остатков более 52 250 лет (КІА-26282). Отложения перекрыты ледовым комплексом. Ширина опробованной жилы составляет 1,0–1,2 м, видимая мощность около 2 м, голова жилы оплавлена. Ширина ледяных жилок варьирует от 5 до 7 мм, ширина минеральных прослоев составляет 7–10 мм.

На южном берегу о. Котельный ПЛЖ вскрыта на высоте 2,5–3,5 м над уровнем моря в толще льдистых гравелистых песков, подстилающих ледовый комплекс. Абсолютный возраст растительных остатков и мха в перекрывающих пески отложениях ледового комплекса составляет  $45\,960 \pm 2460$ –1880 лет (КІА-25741) и  $52\,790 \pm 4110$ –2710 лет (КІА-25743). Ширина жилы около 1 м, видимая мощность 1,5 м. Голова жилы оплавлена и имеет округлую форму. Ширина элементарных ледяных жилок около 5 мм, ширина минеральных прослоев составляет 7–10 мм. Лед характеризуется включением крупных (диаметром 1–2 мм) пузырьков воздуха. Минеральные прожилки включают мелкий плохо окатанный гравий.

Обнажениями на южном берегу о. Бол. Ляховский вскрыто несколько ярусов ПЛЖ в отложениях среднего и верхнего плейстоцена [Куницкий, 1998; Meyer et al., 2002]. Вмещающие ПЛЖ отложения представлены здесь серо-желтыми пылеватыми тонкозернистыми песками с редкой галькой и серыми, серо-коричневыми алевритами с корнями трав. Характерной чертой криогенного строения являются частые фрагменты ПЛЖ, включенные в ПЖЛ, – переходы в горизонтальном и вертикальном профиле одной жилы от ПЖЛ к ПЛЖ. В некоторых случаях ПЖЛ как бы “вырастают” из песчано-ледяных жил. В вертикальном профиле жилы происходит замещение песчаных прослоев (элементарных жилок) на ледяные. Для отдельных разрезов о. Бол. Ляховский, содержащих ПЛЖ, характерно также наличие хорошо сохранившихся (без следов таяния) голов жильных льдов с ростками ПЛЖ.

В дельте Лены песчано-ледяные жилы установлены как в разрезах III надпойменной террасы (обрывы островов Харданг-Сисэ, Курунгнах-Сисэ и др.), так и в пределах I надпойменной (голоценовой) террасы [Куницкий, 1989]. Здесь также отмечаются случаи перехода от ПЛЖ к ПЖЛ в пределах одной жилы (острова Самойловский, Харданг-Сисэ).

На Земле Бунге, около полярной станции “Земля Бунге”, на высокой песчаной террасе (11 м над уровнем моря) были опробованы современные песчано-ледяные жилы. Сухая поверхность террасы практически лишена растительности и разбита сетью полигонов, диаметр которых достигает 18–20 м. Глубина полигональных канав около 20–30 см. Мощность сезонноталого слоя (по данным на конец августа) составляла 50 см. Вскрытая шурфом, заложенным по морозобойной трещине, ПЛЖ имела в верхней части современный ледяной росток и несколько ледяных и песчаных жилок шириной около 10 мм. Следует отметить высокую весовую влажность песков, вмещающих ПЛЖ, достигающую 20–30 %.

Приведенные данные показывают широкое распространение песчаных отложений с ПЛЖ в разрезах четвертичных отложений на крайнем севере Якутии. Особенности криогенного строения отложений, включающих ПЛЖ, свидетельствуют о субэаральных условиях их формирования. Во многих случаях песчано-ледяные жилы образуют с повторно-жильными льдами единую полигональную систему. Наблюдаются переходы от ПЛЖ к ПЖЛ как в горизонтальном, так и в вертикальном профиле одной жилы. Следует также отметить, что формирование ПЛЖ происходит и в настоящее время. Районами современного развития ПЛЖ являются некоторые участки дельты Лены и Земля Бунге.

#### ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПЕСЧАНО-ЛЕДЯНЫХ ЖИЛ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В большинстве изученных разрезов ПЛЖ образуют с ПЖЛ единые полигонально-жильные системы, характеризующиеся взаимными переходами от ПЛЖ к ПЖЛ. В некоторых случаях ПЛЖ контактируют с внедряющимися в них сверху мощными клиньями ПЖЛ ледового комплекса. Поэтому целесообразно рассматривать изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) как ПЛЖ, так и ПЖЛ (таблица). Данные изотопного анализа подтверждают представления о весьма суровых климатических условиях формирования ПЛЖ. Этот вывод основывается на существенно более низких значениях  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  ПЛЖ по сравнению со льдом современных (голоценовых) полигонально-жильных структур и относится к температурам зимнего периода.

Наиболее легкий изотопный состав установлен для ПЛЖ в отложениях среднего–верхнего плейстоцена о. Бол. Ляховский. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в некоторых случаях опускаются здесь до  $-35,3\text{‰}$ , при средних значениях от  $-33,8$  до  $-34,6\text{‰}$  (см. таблицу, рис. 4). Однако в большинстве случаев лед ПЖЛ, образующий здесь с ПЛЖ единые полигонально-жильные системы, характеризуется еще более низкими значениями изотопного состава (до  $-36,2\text{‰}$ – $-37,3\text{‰}$ ). Отметим, что это самые низкие значения изотопного состава, полученные для ПЖЛ на севере Якутии. Зафиксированные ранее минимальные значения  $\delta^{18}\text{O}$  в верхнеплейстоценовых ПЖЛ не опускались ниже  $-34,5\text{‰}$ – $-34,9\text{‰}$  [Васильчук, 1992]. Расположенные выше по разрезу верхнеплейстоценовые ПЛЖ и ПЖЛ характеризуются более тяжелым изотопным составом (средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-30,5$  до  $-31,3\text{‰}$ ). Приведенные данные отражают наиболее холодные климатические условия формирования ПЛЖ и ПЖЛ в конце среднего плейстоцена. В верхнем плейстоцене формирование ПЛЖ и ПЖЛ ледового комплекса происходило при при-

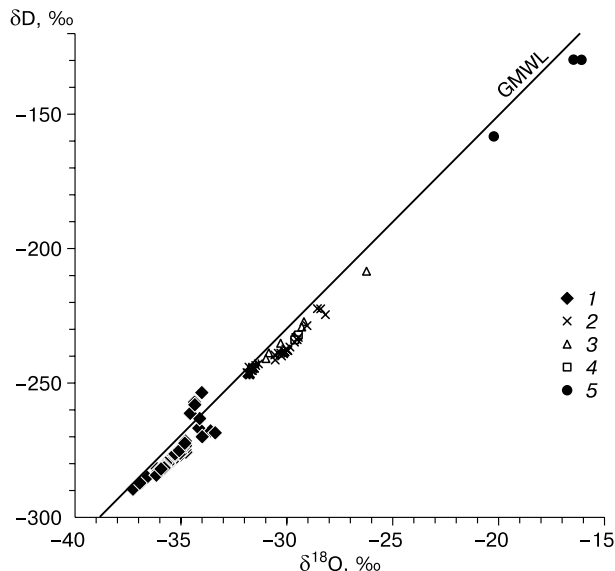


Рис. 4. Диаграмма соотношения  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta\text{D}$  (‰) в песчано-ледяных жилах района исследований относительно глобальной линии метеорных вод (GMWL):

1 – о. Бол. Ляховский; 2 – м. Мамонтов Клык; 3 – о. Котельный; 4 – о. Столбовой; 5 – Земля Бунге.

мерно одинаковых зимних температурах. Средние значения изотопного состава верхнеплейстоценовых (докаргинских) ПЛЖ, охарактеризованные по нескольким районам их развития, показывают его сходство на островах Бол. Ляховский, Котельный и Столбовой и мысе Мамонтов Клык (см. таблицу, рис. 4). Вариации средних значений  $\delta^{18}\text{O}$  ПЛЖ составляют от  $-28,5$  до  $-31,7\text{‰}$ , для ПЖЛ в этих же отложениях достигают  $-29,2\text{‰}$ – $-32,0\text{‰}$ . Сходство изотопного состава льда ПЛЖ и ПЖЛ указывает на общность происхождения питавших их вод, формировавшихся преимущественно за счет таяния снега и ледников. Это согласуется с пресноводным генезисом вмещающих эти льды отложений.

Переход от ПЛЖ к ПЖЛ в разрезе одной жилы может сопровождаться как утяжелением изотопного состава, так и его более негативным составом. На о. Бол. Ляховский из пяти опробованных смешанных (ПЛЖ + ПЖЛ) полигонально-жильных структур в трех случаях переход от ПЖЛ к ПЛЖ сопровождался утяжелением изотопного состава в среднем на  $1,3$ – $1,5\text{‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$  (в таблице – R-6, R-7, R-8). На участке мыс Мамонтов Клык опробованная ПЖЛ + ПЛЖ система также показала незначительное утяжеление изотопного состава при переходе от ПЖЛ к ПЛЖ в среднем на  $0,9\text{‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$  (в таблице – МАК-1W-10).

В случае контакта ПЖЛ ледового комплекса с нижележащими ПЛЖ на участке мыс Мамонтов Клык также можно отметить как случаи незначи-

**Изотопный состав песчано-ледяных жил (ПЛЖ) повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в песках и отложениях ледового комплекса (ПЖЛ (ЛК))**

№ п/п	Участок опробования	Геол. индекс	Номер жилы	Высота над ур. моря, м	Тип льда	Кол-во образ- цов	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰			$\delta\text{D}$ , ‰			$d_{\text{exs}}$ ‰		
							сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.
1	О. Бол. Ляховский	$Q_2-Q_3$	R-17+30	3	ПЛЖ (?)	30	-31,4	-32,3	-29,6	-245,3	-255,5	-229,3	5,8	2,4	12,0
2		$Q_2-Q_3$	R-17	7	ПЛЖ	15	-33,8	-34,8	-32,3	-265,5	-273,2	-252,1	4,7	2,7	7,1
3		$Q_2-Q_3$	R-17	7	ПЖЛ	23	-30,7	-32,7	-27,0	-239,2	-258,6	-208,2	6,2	2,4	8,3
4		$Q_2-Q_3$	R-6	6,5	ПЛЖ	7	-34,6	-35,3	-33,4	-273,8	-277,0	-267,6	3,2	-1,0	5,4
5		$Q_2-Q_3$	R-6	6,5	ПЖЛ	11	-36,0	-37,3	-34,1	-280,8	-289,3	-266,6	7,4	2,6	9,4
6		$Q_2-Q_3$	R-7	6,5	ПЛЖ	6	-34,3	-34,6	-34,1	-258,2	-263,1	-253,4	16,5	10,2	19,1
7		$Q_2-Q_3$	R-7	6,5	ПЖЛ	24	-35,6	-36,2	-34,8	-278,6	-284,1	-271,5	5,9	4,7	7,3
8		$Q_3$	R-8	15,4	ПЛЖ	8	-30,5	-31,0	-29,8	-229,3	-237,3	-221,1	14,4	7,2	21,4
9		$Q_3$	R-8	15,4	ПЖЛ (ЛК)	10	-32,0	-32,7	-30,3	-246,1	-251,6	-232,8	10,3	8,6	15,0
10	О. Столбовой	$Q_3$	TZ-2-5	16,8	ПЛЖ	6	-31,3	-32,4	-29,9	-232,2	-243,6	-226,3	18,5	11,5	24,6
11		$Q_3$	TZ-2-5	16,8	ПЖЛ	4	-30,5	-30,9	-30,0	-235,4	-239,7	-231,3	8,5	7,5	10,3
12		$Q_3$	Sto-IW-2	3	ПЛЖ	5	-29,5	-29,6	-29,5	-234,0	-233,1	-232,1	2,9	3,2	3,5
13	О. Котельный	$Q_3$	KYS-IW-2	3	ПЛЖ	6	-29,5	-31,0	-26,2	-240,9	-229,9	-208,4	1,5	5,9	8,0
14		$Q_3$	МАК-IW-28	1,5	ПЛЖ	19	-31,7	-31,9	-31,3	-245,4	-246,9	-242,9	8,1	7,1	10,2
15		$Q_3$	МАК-IW-28	1,5	ПЖЛ (ЛК)	63	-30,9	-31,7	-29,5	-239,7	-246,1	-229,6	7,5	6,2	9,0
16		$Q_3$	МАК-IW-1	3	ПЛЖ	2	-28,5	-28,6	-28,4	-222,4	-222,4	-222,4	5,5	4,8	6,1
17		$Q_3$	МАК-IW-1	3	ПЖЛ (ЛК)	4	-29,2	-30,0	-28,7	-228,4	-236,4	-223,9	5,1	3,6	6,0
18		$Q_3$	МАК-IW-2	3	ПЛЖ	18	-30,0	-30,6	-29,0	-237,1	-239,9	-228,7	2,7	1,6	5,0
19		$Q_3$	МАК-IW-10	10	ПЛЖ	13	-29,6	-32,0	-27,2	-232,4	-250,8	-213,7	4,4	2,3	5,6
20		$Q_3$	МАК-IW-10	10	ПЖЛ	6	-30,5	-34,9	-28,4	-238,5	-272,2	-222,6	5,4	4,4	6,7
21		$Q_4$	Вип-95	3	ПЛЖ	3	-17,6	-20,2	-16,1	-139,3	-158,3	-129,8	1,4	-1,1	3,5

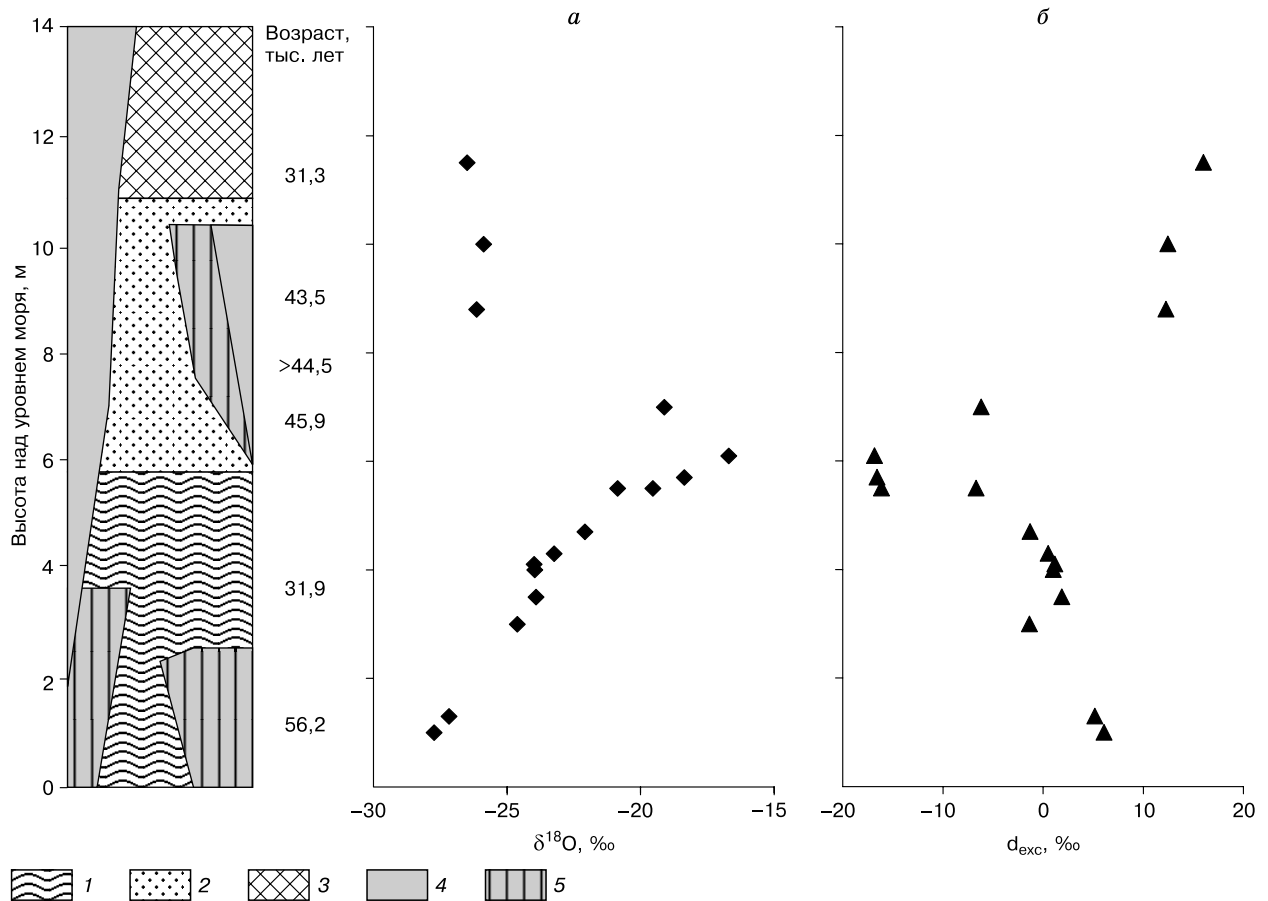


тельного утяжеления изотопного состава, так и его облегчение в среднем на 0,7–0,8 ‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  (в таблице – МАК-IW-1, МАК-IW-28). Эти примеры показывают, что температурные колебания (зафиксированные в изотопном составе ПЛЖ и ПЖЛ) не являются определяющим фактором для формирования того или иного типа жил. Это согласуется с ранее полученным выводом о том, что образование различных типов жил – песчано-ледяных (грунтово-ледяных) или ледяных – определяется главным образом составом грунтов и их увлажненностью в СТС [Black, Berg, 1964; Данилова, 1968; Романовский, 1977].

Изотопный состав ПЛЖ и ПЖЛ в смешанных жилах характеризуется значительным разбросом значений. Вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  льда в ПЛЖ на о. Бол. Ляховский достигают 2,5–2,7 ‰, в ПЖЛ до 5,7 ‰ (по дейтерию до 50 ‰) (см. таблицу). На участке мыс Мамонтов Клык разброс значений изотопного состава  $\delta^{18}\text{O}$  еще больше: для ПЛЖ он составляет 4,8 ‰, для ПЖЛ до 6,5 ‰. Чередование в горизонтальном профиле одной

жилы песчано-ледяных образований и повторно-жильных льдов, резкие скачки изотопного состава отражают нестабильные ландшафтные и гидрологические условия формирования смешанных (ПЛЖ + ПЖЛ) систем жильных льдов. Следует отметить также сходство изотопного состава смешанной жилы МАК-IW-10 и примыкающего к ней пласта (линзы) массивного льда. Средние значения изотопного состава льда:  $\delta^{18}\text{O} = -28,4$  ‰,  $\delta\text{D} = -223,4$  ‰. Лед по особенностям своего строения не является повторно-жильным и может быть интерпретирован как погребенный лед пресноводного водоема.

Изменение условий подземного льдообразования на последнем этапе формирования песчаной толщи нашло отражение и в изотопном составе текстурных льдов. На рис. 5 приведен изотопный профиль льда-цемента из разреза песков на участке мыс Мамонтов Клык. Лед-цемент в песках над ПЛЖ значительно изотопически тяжелее, чем во вмещающих их отложениях, а величина  $d_{\text{exc}}$  снижается до отрицательных значений. Так,  $\delta^{18}\text{O}$



**Рис. 5.** Изотопный состав (а) и избыток дейтерия (б) льда-цемента верхней части разреза песков на участке мыс Мамонтов Клык:

1 – песок; 2 – песок, алевроит с прослоями и линзами торфа; 3 – оторфованные алевроиты (ледовый комплекс); 4 – ПЖЛ; 5 – ПЛЖ.



мерзлого песка над головой ПЛЖ (около 4 м над уровнем моря) достигает  $-24\text{‰}$ , а на границе с перекрывающим пески комплексом 2 (на высоте около 6 м над уровнем моря) повышается до  $-16\text{‰}$ – $-19\text{‰}$  (см. рис. 5). Это может быть связано с увеличением доли дождевых вод в составе льда и испарительным фракционированием, что нашло отражение в существенном понижении значений  $d_{\text{exs}}$ . Характерно, что выше по разрезу (около 10 м над уровнем моря) в зоне формирования смешанных ПЖЛ и ПЛЖ изотопный состав текстурных льдов вмещающих эти системы отложений снова становится существенно легче ( $-26\text{‰}$ ), а значения  $d_{\text{exs}}$  повышаются до  $10\text{‰}$ – $15\text{‰}$ .

Прекращение роста ПЛЖ, вероятно, связано с изменением ландшафтных и гидрологических условий, приведших к зарастанию песков, на что указывает обилие корней растений в верхней части разреза песков и увеличение влажности пород СТС. За этим последовало заболачивание территории, развитие процессов торфообразования, увеличение в составе отложений пылеватых фракций. В зоне перехода от перекрывающих ПЛЖ песков к оторфованным пескам и алевритам (комплекс 2) формируются смешанные (ПЛЖ + ПЖЛ) полигонально-жильные структуры. Головы этих жил залегают ниже прослоев торфа, к которым они приурочены, а их хвосты иногда достигают уровня лежащих ниже в песках ПЛЖ.

На основе имеющихся датировок для верхней части разреза можно сделать вывод, что формирование мощных сингенетических ПЛЖ закончилось около 50 тыс. лет назад. Условия для формирования небольших смешанных жил (ПЖЛ + ПЛЖ) сохранялись примерно до 30–35 тыс. лет назад – начала накопления на участке мыс Мамонтов Клык толщи льдистых алевритов с мощными сингенетическими ПЖЛ (ледового комплекса).

Наиболее тяжелый изотопный состав имеют современные ПЛЖ. Так, песчано-ледяные жилы, формирующиеся в настоящее время на Земле Бунге, тяжелее (для  $\delta^{18}\text{O}$ ) на  $12\text{‰}$ – $18\text{‰}$  (см. таблицу, рис. 5), чем опробованные древние ПЛЖ среднего и верхнего плейстоцена. Следует отметить, что формирование ПЛЖ на Земле Бунге происходит в своеобразных климатических и ландшафтных условиях. Основная часть поверхности лишена растительного покрова и представляет собой развеваемые пески полярной пустыни. Между тем у подошвы слоя сезонного оттаивания пески переувлажнены и имеют текучую консистенцию. Холодные зимы (среднезимняя температура воздуха составляет  $-23\text{°C}$ , а среднегодовая температура воздуха равна  $-14,8\text{°C}$ ) отличаются малоснежностью. Годовая сумма осадков не превышает  $130\text{--}140\text{ мм}$ , из них до  $80\text{‰}$  приходится на летний период, когда осадки выпадают в виде морозящих дождей и мелкого снега. Для района характерно большое

количество дней с ветрами (до 300), в результате чего происходит существенное перераспределение маломощного снежного покрова. Результаты изотопного анализа показывают, что в питании современных растущих ПЛЖ могут участвовать не только талые снеговые, но дождевые воды. На это указывает тяжелый изотопный состав льда и низкие значения  $d_{\text{exs}}$ , свойственные летним осадкам.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что широко распространенные в береговой зоне и на островах моря Лаптевых многолетнемерзлые песчаные отложения содержат полигонально-жильные структуры с песчано-ледяным заполнителем – песчано-ледяные жилы. Ширина ПЛЖ достигает 4–5 м. Возраст вмещающих отложений более 50 тыс. лет.

2. Многоярусное расположение ПЛЖ в разрезах, частые переходы в пределах одной полигонально-жильной системы от ПЛЖ к ПЖЛ свидетельствуют о многократных сменах гидрологического режима мелководного, периодически осушающегося пресноводного бассейна и фациальных условий осадконакопления песчаных отложений.

3. Толща песков с песчано-ледяными жилами, как правило, перекрывается отложениями ледового комплекса, возраст которых в районе мыса Мамонтов Клык составляет 30–35 тыс. лет. Переход от песчаной толщи к отложениям ледового комплекса сопровождается увеличением содержания пылеватых частиц, органических включений, прослоев и линз торфа, возраст которых около 40–46 тыс. лет. Мощные сингенетические ледяные жилы ледового комплекса внедряются в нижележащую песчаную толщу на глубину до 5–6 м, нередко расщепляя ПЛЖ.

4. Изотопный состав ПЛЖ весьма близок к изотопному составу ПЖЛ ледового комплекса, что указывает на генетическое сходство источников их питания. Характеристики изотопного состава ПЛЖ подтверждают существующие представления о сухих и холодных климатических условиях периода их формирования. Среднезимние температуры воздуха периода формирования ПЛЖ в среднем–верхнем плейстоцене по приближенной формуле Ю.К. Васильчука [1992] могли быть ниже современных на  $15\text{°C}$  и более, а верхнем плейстоцене – на  $10\text{--}12\text{°C}$ .

5. Современное образование ПЛЖ в песчаных отложениях (Земля Бунге, Новосибирские о-ва) происходит в условиях сурового (среднезимняя температура воздуха около  $-23\text{°C}$ ) и сухого (годовое количество осадков  $130\text{--}140\text{ мм}$ ) климата. Относительно высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ , вероятно, связаны с процессами изотопного фракционирования в результате интенсивного испарения.

## Литература

- Боярский О.Г., Митт К.Л.** Новые данные об ископаемых льдах в тундре Анабаро-Оленекского междуречья // Мерзлотные исслед., 1961, вып. I, с. 154–161.
- Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М., 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.
- Геокриология СССР.** Средняя Сибирь. М., Недра, 1989, с. 150–160.
- Данилова Н.С.** Об образовании ледяных и песчаных жил в пределах единой системы морозобойных трещин (дельта Лены) // Мерзлотные исслед., 1968, вып. VIII, с. 227–233.
- Катасонов Е.М.** Криогенные текстуры, ледяные и земляные жилы как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений // Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 37–44.
- Куницкий В.В.** Криолитология низовья Лены. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1989, 162 с.
- Куницкий В.В.** Ледовый комплекс и криопланационные террасы острова Большого Ляховского // Проблемы геокриологии. Якутск, Кн. изд-во, 1998, с. 60–72.
- Романовский Н.Н.** Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, Наука, 1977, 216 с.
- Романовский Н.Н.** Основы криолитогенеза литосферы. М., Изд-во МГУ, 1993, 335 с.
- Berg T.E., Black R.F.** Preliminary measurements of growth of non-sorted polygons, Victoria Land, Antarctica // Amer. Geophys. Union Antarctic Res. Ser., 1966, vol. 8, p. 61–108.
- Black T.E., Berg R.F.** Glacier fluctuations recognized by patterned ground, Victoria Land // Proc. of the First Intern. Symp. on Antarctic Geology, North Holland, Amsterdam, 1964, p. 107–122.
- Dansgaard W.** Stable isotopes in precipitation // Tellus, 1964, No. 16, p. 436–468.
- Mackay J.R., Matthews J.V.** Pleistocene ice and sand wedges, Hooper Islands, Northwest Territories // Can. J. Earth Sci., 1983, No. 20, p. 1087–1097.
- Magens D., Meyer H., Schirrmeister L. et al.** Structure and composition of Late Quaternary permafrost sequences at Cape Mamontov Klyk, Northern Siberia, and the palaeoenvironmental and palaeoclimate implications // Second European Conf. on Permafrost (June 12–16, 2005): Abstr., Potsdam, Germany, 2005, p. 110.
- Meyer H., Dereviagin A.** Ice wedges of cape Mamontov Klyk // Rep. on Polar Res., 2004, vol. 489, p. 112–132.
- Meyer H., Dereviagin A.Yu., Siegert Ch., Hubberten H.-W.** Hydrogen and oxygen isotopes in ground ice – A valuable tool for paleoclimatic studies on Big Lyakhovsky Island, North Siberia // Permafrost and Periglacial Processes, 2002, No. 13, p. 91–105.
- Murton J.B., Worsley P., Gozdzik J.** Sand veins and wedges in cold Aeolian environments // Quatern. Sci. Rev., 2000, No. 19, p. 899–922.
- Péwé T.L.** Sand-wedge polygons (tessellations) in the McMurdo Sound Region, Antarctica – a progress report // Amer. J. Sci., 1959, No. 257, p. 545–552.

Поступила в редакцию  
19 апреля 2006 г.